



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ОСНОВИ МЕХАНІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка», освітньою програмою «Електричні системи і мережі»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2019

Основи механічних розрахунків повітряних ліній електропередавання : Практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньої програми «Електричні системи і мережі» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Т. Л. Кацадзе. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,72 МБ). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 53 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 3 від 28.11.2019 р.)
за поданням Вченої ради Факультету електроенерготехніки та автоматики
(протокол № 4 від 25.11.2019 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

ОСНОВИ МЕХАНІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

ПРАКТИКУМ

Укладач: *Кацадзе Теймураз Луарсабович*, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний
редактор *Баженов В. А.*, канд. техн. наук, доц.

Рецензент *Дмитренко О. О.*, канд. техн. наук, доц., доцент кафедри автоматизації енергосистем КПІ ім. Ігоря Сікорського

Навчальний посібник містить розв'язання сімнадцяти типових задач, які охоплюють всі змістовні модулі дисципліни «Основи механічних розрахунків повітряних ліній електропередавання». Призначений для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Електричні системи і мережі» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП..... | 4 |
| Задача 1..... | 5 |
| Задача 2..... | 8 |
| Задача 3..... | 9 |
| Задача 4..... | 10 |
| Задача 5..... | 11 |
| Задача 6..... | 13 |
| Задача 7..... | 18 |
| Задача 8..... | 19 |
| Задача 9..... | 21 |
| Задача 10 | 23 |
| Задача 11 | 27 |
| Задача 12 | 28 |
| Задача 13 | 37 |
| Задача 14 | 39 |
| Задача 15 | 46 |
| Задача 16..... | 49 |
| Задача 17 | 50 |
| СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ | 53 |

ВСТУП

Навчальний посібник містить розв'язання типових практичних задач з дисципліни «Основи механічних розрахунків повітряних ліній електропередавання» студентів, які навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньою програмою «Електричні системи і мережі».

Дисципліна «Основи механічних розрахунків повітряних ліній електропередавання» належить до складу базових у циклі підготовки фахівців за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньою програмою «Електричні системи і мережі». Метою вивчення дисципліни є формування у студента системи ґрунтовних знань та практичних навичок в області конструктивного виконання повітряних ліній електропередавання, необхідних для вирішення експлуатаційних та проектно-конструкторських завдань, які виникають під час проектування, будівництва та експлуатації повітряних ліній.

У навчальному посібнику наведено розв'язання сімнадцяти типових задач, які охоплюють всі змістовні модулі дисципліни, зокрема:

1. Конструктивне виконання та умови експлуатації повітряних ліній електропередавання
2. Експлуатаційні характеристики проводів та тросів повітряних ліній
3. Механічний розрахунок конструктивних елементів повітряних ліній електропередавання
4. Аналіз аварійних режимів повітряних ліній електропередавання
5. Проектне розташування опор за профілем траси повітряної лінії

Матеріал, наведений у навчальному посібнику сприяє закріпленню у студентів знань, вмінь та навичок, набутих під час вивчення лекційного матеріалу дисципліни, у тому числі:

- конструкції, типів і принципів роботи лінійного обладнання електричних мереж;
- кліматичних умов роботи повітряних ліній електропередавання;
- особливостей кліматичних навантажень та впливів на конструктивні елементи повітряних ліній;
- новітніх методів дослідження механічних навантажень на конструктивні елементи повітряних ліній
- підходів до розв'язання практичних задач проектування та експлуатації повітряних ліній електропередавання усіх рівнів ієрархії номінальних напруг.
- вибору найбільш ефективних методів і моделей розрахунку кліматичних режимів повітряних ліній електропередавання.

Задача 1.

Повітряна лінія електропередавання виконана проводами марки АС-400/64.

Визначити еквівалентні модуль пружності та коефіцієнт теплового здовження сталеалюмінієвого проводу. Дослідити розподіл тяжіння між сталевими та алюмінієвими проволочками проводу. Визначити теплове напруження, що виникає під час нагрівання / охолодження проводу.

Сталеалюмінієвий провід АС-400/64 складається із сталевго осереддя, звитого з 7 сталевих оцинкованих проволоок діаметром 3,4 мм (один повив проволоч) та струмопровідної частини з 26 алюмінієвих проволоок діаметром 4,37 мм (два повиву), як показано на рис. 1.

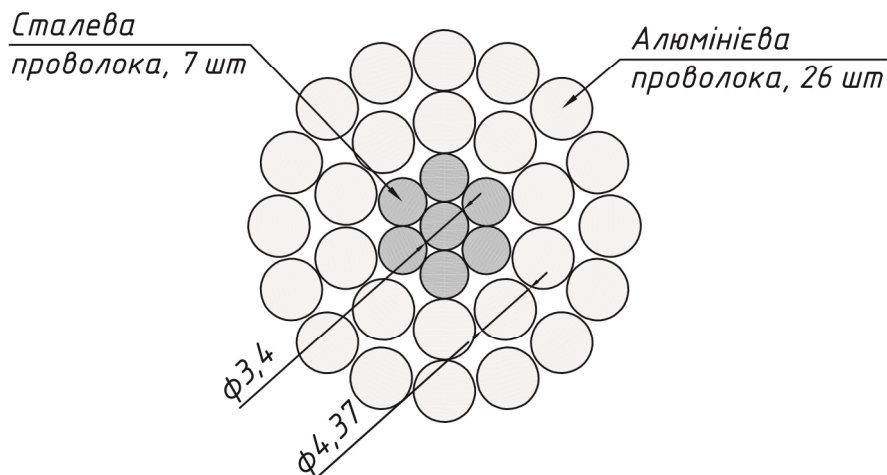


Рис. 1. Поперечний переріз проводу АС 400/64

Технічні характеристики матеріалів проволоок осереддя та струмопровідної частини становлять

| | осереддя | струмопровідний шар |
|----------------------------------|---|---|
| – кількість проволоок | $n_c := 7$ | $n_a := 26$ |
| – діаметр проволоок | $d_c := 3.4 \text{ мм}$ | $d_a := 4.37 \text{ мм}$ |
| – модуль пружності | $E_c := 200 \text{ ГПа}$ | $E_a := 63 \text{ ГПа}$ |
| – коефіцієнт теплового здовження | $\alpha_c := 12 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ | $\alpha_a := 23 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ |

Розрахункові перерізи складових сталевалюмінієвого проводу та сумарний переріз складають

$$F_c := n_c \cdot \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} = 63.55 \text{ мм}^2 \quad F_a := n_a \cdot \frac{\pi \cdot d_a^2}{4} = 389.97 \text{ мм}^2$$

$$F := F_c + F_a = 453.52 \text{ мм}^2$$

Співвідношення перерізів струмопровідної частини до сталевого осереддя дорівнює

$$k := \frac{F_a}{F_c} = 6.136$$

Отриманий результат свідчить про те, що даний провід призначений для роботи в умовах середніх механічних навантажень. При цьому переріз сталевого осереддя складає

$$\frac{F_c}{F} = 14.0\% \text{ сумарного перерізу проводу.}$$

Співвідношення між модулями пружності та коефіцієнтами теплового здовження перерізів струмопровідної частини до сталевого осереддя складають

$$m := \frac{E_a}{E_c} = 0.315 \quad n := \frac{\alpha_a}{\alpha_c} = 1.917$$

Еквівалентні модуль пружності та коефіцієнт теплового здовження сталевалюмінієвого проводу складають

$$E := E_c \frac{1 + k \cdot m}{1 + k} = 82.2 \text{ ГПа}$$

$$\alpha := \alpha_c \frac{1 + k \cdot m \cdot n}{1 + k \cdot m} = 19.2 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$$

Зазначимо, що довідникові матеріали подають еквівалентний модуль пружності сталевалюмінієвого проводу з округленням до 500 МПа, тобто

$$E := 82.5 \text{ ГПа}$$

Визначимо розподіл навантаження між сталевим осередком та струмопровідною алюмінієвою частиною проводу

$$T_c := \frac{1}{1 + k \cdot m} = 34.1\%$$

$$T_a := \frac{k \cdot m}{1 + k \cdot m} = 65.9\%$$

Отже, сталеве осереддя проводу сприймає більше 1/3 навантаження за перерізу, що складає менше 15% сумарного.

Водночас, через менший переріз осереддя, сталеві проволочки зазнають суттєво більшого напруження, ніж алюмінієві. Дійсно, виникнення тягіння 1 κH обумовлює такі напруження сталевих та алюмінієвих проволочок:

$$\sigma_c := \frac{T_c \cdot 1 \text{ } \kappa H}{F_c} = 5.365 \text{ } МПа$$

$$\sigma_a := \frac{T_a \cdot 1 \text{ } \kappa H}{F_a} = 1.69 \text{ } МПа$$

співвідношення між якими становить

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_a} = 3.175$$

Тобто напруження проволочок сталевих осереддя більше, ніж в три рази перевищує напруження алюмінієвих проволочок.

Визначимо теплове напруження, що виникає в проволочках сталевих осереддя та струмопровідної частини проводу за зміни температури на 1 градус.

$$\sigma_c := (\alpha - \alpha_c) E_c = 1449.87 \frac{\kappa Па}{K}$$

$$N_c := \sigma_c \cdot F_c = 92.146 \frac{H}{K}$$

$$\sigma_a := (\alpha - \alpha_a) E_a = -236.29 \frac{\kappa Па}{K}$$

$$N_a := \sigma_a \cdot F_a = -92.146 \frac{H}{K}$$

Додатний знак теплового напруження сталевих проволочок означає, що із збільшенням температури сталеві проволочки зазнають додаткового розтягуючого зусилля. Від'ємний знак теплового напруження алюмінієвих проволочок означає, що із збільшенням температури алюмінієві проволочки зазнають додаткового стискаючого зусилля.

Через менший переріз сталевго осереддя теплове напруження сталевих проволок істотно перевищує напруження алюмінієвих проволок проводу. Очевидно, таке співвідношення відповідає оберненому відношенню між перерізами струмопровідної частини до сталевго осереддя проводу.

$$\left| \frac{\sigma_c}{\sigma_a} \right| = 6.136$$

Задача 2.

Провід повітряної лінії марки АС-400/64 зазнає питомого навантаження 100 кПа/м , напруження проводу складає 120 МПа .

Визначити стріли провисання проводу у прогонах довжиною 900 та 450 м.

Відповідно до умов задачі експлуатаційні характеристики проводу становлять

- питоме навантаження на провід $\gamma := 100 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$
- напруження проводу $\sigma := 120 \text{ МПа}$
- довжини прогонів $l_1 := 900 \text{ м} \quad l_2 := 450 \text{ м}$

Розглянемо спочатку більший прогін, довжиною 900 м. Оскільки довжина прогону перевищує 800 м, стрілу провисання слід визначати за двоскладовим виразом

$$f_1 := \frac{\gamma \cdot l_1^2}{8 \sigma} + \frac{\gamma^3 l_1^4}{384 \sigma^3} = 85.364 \text{ м}$$

Співвідношення між другою та першою складовими стріли провисання проводу становить

$$\frac{1}{3} \left(\frac{\gamma \cdot l_1}{4 \sigma} \right)^2 = 1.2\%$$

Отриманий результат свідчить про істотність похибки у визначенні стріли провисання у разі нехтування другим доданком двоскладового виразу для прогону довжиною 900 м.

Для другого прогону довжиною 450 **м** похибка у разі нехтування другим доданком зневажливо мала і становить

$$\frac{1}{3} \left(\frac{\gamma \cdot l_2}{4 \sigma} \right)^2 = 0.3\%$$

Це визначає допустимість визначення стріли провисання проводу за односкладовим виразом

$$f_2 := \frac{\gamma \cdot l_2^2}{8 \sigma} = 21.094 \text{ м}$$

Задача 3.

Провід повітряної лінії марки АС-400/64 зазнає питомого навантаження 100 **кПа/м**, напруження проводу в нижній точці провисання становить 120 **МПа**, стріла провисання у прогоні дорівнює 21 **м**.

Визначити тяжіння в точках закріплення проводу на опорах.

Відповідно до умов задачі технічні та експлуатаційні характеристики проводу становлять

- | | |
|---------------------------------|---|
| - переріз проводу | $F := 453.52 \text{ мм}^2$ |
| - питоме навантаження на провід | $\gamma := 100 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$ |
| - напруження проводу | $\sigma_0 := 120 \text{ МПа}$ |
| - стріла провисання | $f := 21 \text{ м}$ |

Напруження проводу в точках закріплення на опорах дорівнює

$$\sigma := \sigma_0 + \gamma \cdot f = 122.1 \text{ МПа}$$

Відповідне тяжіння становить

$$T := \sigma \cdot F = 55.4 \text{ кН}$$

Збільшення тяжіння в точках закріплення проводу понад значення в нижній точці провисання складає

$$\frac{\gamma \cdot f}{\sigma_0} = 1.75\%$$

Отриманий результат свідчить про допустимість проведення механічних розрахунків за тяжінням (напруженням) в нижній точці провисання проводу з урахуванням допустимого 5%-го перевищення допустимого тяжіння в точках закріплення проводу на опорах.

Задача 4.

Провід повітряної лінії марки АС-400/64 закріплено у прогоні довжиною 400 *м*. Стріла провисання проводу дорівнює 21 *м*.

Визначити довжину проводу у прогоні.

Відповідно до умов задачі технічні характеристики проводу у прогоні становлять

- довжина прогону $l := 400 \text{ м}$

- стріла провисання $f := 21 \text{ м}$

Довжина проводу в прогоні за двокомпонентним виразом становить

$$L := l + \frac{8}{3} \frac{f^2}{l} = 402.94 \text{ м}$$

Для прогону довжиною 400 м нехтування третім компонентом виразу для визначення довжини проводу допустимо, оскільки похибка зневажливо мала та складає всього

$$\frac{32}{15} \frac{f^4}{l^3 L} = 0.0016\%$$

Довжина проводу в прогоні перевищує довжину прогону на

$$L - l = 2.94 \text{ м} \qquad \frac{L - l}{l} = 0.73\%$$

Отриманий результат свідчить про допустимість припущення про рівномірний розподіл навантаження вздовж прогону під час формування спрощеної моделі кривої провисання проводу у формі параболи.

Задача 5.

Повітряна лінія напругою 110 кВ виконана сталевалюмінієвими проводами марки АС-240/39, змонтованими на проміжних багатограних опорах ПМ-110-1ф з використанням стрижневих полімерних ізоляторів ЛК 70/110-3.

Визначити середню висоту розташування центру мас проводів лінії для габаритного прогону.

Конструктивні розміри проміжної опори ПМ-110-1ф та лінійного ізолятора ЛК 700/110-3 зазначено на рис. 2 та 3 відповідно.

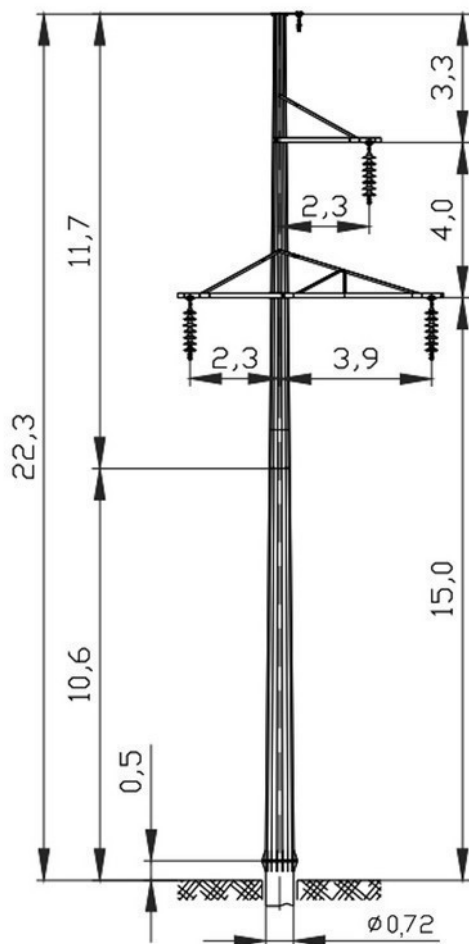


Рис. 2. Проміжна опора ПМ-110-1ф

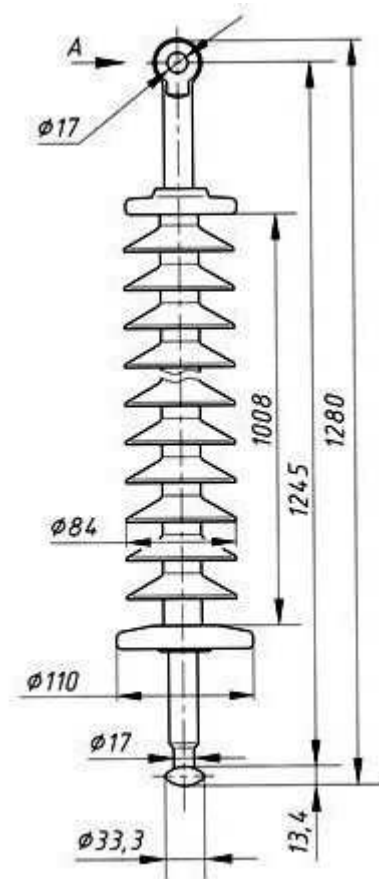


Рис. 3. Ізоляційний підвіс ЛК 70/110-3

Конструктивні розміри опори ПМ-110-1ф

- висота нижніх траверс $h_1 := 15 \text{ м}$

- висота верхньої траверси $h_3 := h_1 + 4 \text{ м} = 19 \text{ м}$

Будівельна висота ізоляційного підвісу ЛК 70/110-3

$$\lambda := 1280 \text{ мм}$$

Відповідно до схеми опори на рис. Б.2 висота закріплення нижнього проводу на опорі дорівнює

$$h_0 := h_1 - \lambda = 13.72 \text{ м}$$

Середня висота закріплення проводів на опорі становить

$$h_{\text{сер}} := \frac{2 h_1 + h_3}{3} - \lambda = 15.053 \text{ м}$$

Нормована габаритна відстань між проводом та землею лінії напругою 110 кВ для ненаселеної місцевості дорівнює

$$\Gamma := 6 \text{ м}$$

Таким чином, габаритна стріла провисання проводу становить

$$f_z := h_0 - \Gamma = 7.72 \text{ м}$$

Отже, висота розташування зведеного центру мас всіх фазних проводів у прогоні дорівнює

$$h_c := h_{\text{сер}} - \frac{2}{3} f_z = 9.907 \text{ м}$$

Задача 6.

Повітряна лінія напругою 110 кВ виконана проводами марки АС-240/39, змонтованими на проміжних багатогранних опорах ПМ-110-1ф з використанням підвісних лінійних ізоляторів ЛК 70/110-3. Висота розташування зведеного центру мас всіх фазних проводів у прогоні дорівнює 9.907 *м*. Траса повітряної лінії проходить по ненаселеній сільській місцевості II типу, яку віднесено до 3 району за ожеледдю, 1 району за вітровим навантаженням, 2 району за вітровим натиском під час ожеледі.

Розрахувати одиничні та питомі навантаження на проводи повітряної лінії у прогоні довжиною 250 м та визначити режим максимальних навантажень.

Відповідно до умов задачі технічні характеристики проводу АС-240/39 становлять

- розрахунковий переріз $F := 274.67 \text{ мм}^2$
- зовнішній діаметр $d := 21.6 \text{ мм}$
- погонна маса $M_0 := 952 \frac{\text{кг}}{\text{км}}$

Умови в районі траси лінії характеризуються наступними характеристичними значеннями кліматичних навантажень:

- товщина стінки ожеледі $b := 19 \text{ мм}$
- швидкісний натиск вітру $q := 400 \text{ Па}$
- натиск вітру під час ожеледі $q' := 200 \text{ Па}$

Довжина прогону

$$l := 250 \text{ м}$$

Висота розташування зведеного центру мас всіх проводів

$$h_c = 9.907 \text{ м}$$

Лінії електропередавання напругою 110 кВ віднесено до класу безвідмовності ЗКБ, що визначає середній період повторюваності експлуатаційних навантажень 15 років.

1. Навантаження від власної ваги проводу

Одиничні та питомі навантаження від власної ваги проводу становлять:

$$p_1 := g \cdot M_0 = 9.336 \frac{\text{Н}}{\text{м}} \qquad \gamma_1 := \frac{p_1}{F} = 33.99 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$$

2. Навантаження від ваги відкладень ожеледі

Густина льоду $\rho := 0.9 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$

Для ліній класу безперебійності ЗКБ коефіцієнт надійності за вагою ожеледі дорівнює

$$\gamma_{fm} := 0.7$$

Поправковий коефіцієнт за висотою розташування проводу визначимо за методом лінійної інтерполяції:

| h (м) | k |
|------------|-----|
| 5 | 0.8 |
| 10 | 1.0 |

$$k := k_0 + \frac{(h_c - h_0)(k_1 - k_0)}{h_1 - h_0} = 0.996$$

В аналогічний спосіб визначимо поправковий коефіцієнт щодо діаметру проводу:

| $diam$ (мм) | μ |
|----------------|-------|
| 20 | 0.9 |
| 30 | 0.8 |

$$\mu := \mu_0 + \frac{(d - diam_0)(\mu_1 - \mu_0)}{diam_1 - diam_0} = 0.884$$

Таким чином, одиничне навантаження від ваги ожеледі становить

$$p_2 := \rho \cdot g \cdot \gamma_{fm} \cdot \pi \cdot k \cdot \mu \cdot b \cdot (d + k \cdot \mu \cdot b) = 12.45 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

3. Сумарне навантаження від ваги проводу, вкритого ожеледдю

Одиничні та питомі навантаження від ваги проводу, вкритого ожеледдю становлять:

$$p_3 := p_1 + p_2 = 21.786 \frac{\text{Н}}{\text{м}} \qquad \gamma_3 := \frac{p_3}{F} = 79.317 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$$

4. Навантаження від натиску вітру

Для ліній класу безперебійності ЗКБ коефіцієнт надійності за вітровим навантаженням дорівнює

$$\gamma_{fmax} := 0.8$$

Оскільки діаметр проводу перевищує 20 мм, аеродинамічний коефіцієнт становить

$$C_x := 1.1$$

Визначимо складові коефіцієнту динамічності натиску вітру. Коефіцієнт впливу пульсаційного складника для сільської місцевості (тип II) дорівнює

$$q_{tu} := 1.5$$

Коефіцієнт нерівномірності натиску вітру вздовж прогону

$$\alpha_- := 2.6 - 0.3 \ln(q \cdot \text{Па}^{-1}) = 0.803$$

Коефіцієнт довжини прогону

$$K_l := 1.7 - 0.12 \ln(l \cdot \text{м}^{-1}) = 1.037$$

Отже, коефіцієнт динамічності натиску вітру дорівнює

$$C_{dc} := q_{tu} \cdot \alpha_- \cdot K_l = 1.249$$

Визначимо коефіцієнт висоти розташування проводу

$$C_h := 1 \left(0.1 \cdot h_c \cdot \text{м}^{-1} \right)^{2 \cdot 0.15} = 0.997$$

Решта складових коефіцієнту впливу розташування проводів (коефіцієнти рельєфу та напрямку вітру) дорівнюють одиниці:

$$C_R := 1$$

$$C_{DIR} := 1$$

Отже, коефіцієнт впливу розташування проводів становить

$$C_c := C_h \cdot C_R \cdot C_{DIR} = 0.997$$

Таким чином, одиничне навантаження від натиску вітру дорівнює

$$p_4 := \gamma_{fmax} \cdot C_x \cdot C_{dc} \cdot C_c \cdot q \cdot d = 9.469 \frac{H}{м}$$

5. Навантаження від натиску вітру на проводи, вкриті ожеледдю

Для ліній класу безперебійності ЗКБ коефіцієнт надійності за вітровим навантаженням під час ожеледі дорівнює

$$\gamma_{fQ} := 0.71$$

Оскільки в даному режимі проводи вкриті ожеледдю, аеродинамічний коефіцієнт дорівнює

$$C_x := 1.2$$

Коефіцієнт нерівномірності натиску вітру вздовж прогону для режиму вітру під час ожеледі становить

$$\alpha'_- := 2.6 - 0.3 \cdot \ln(q' \cdot Pa^{-1}) = 1.011$$

Оскільки даний коефіцієнт не має перевищувати одиниці, фіксуємо його на порушеній межі, тобто

$$\alpha'_- := 1$$

Решта складових коефіцієнту динамічності натиску вітру такі самі, що й в режимі максимального вітру. Отже

$$C'_{dc} := q_{tu} \cdot \alpha'_- \cdot K_l = 1.556$$

Коефіцієнт впливу розташування проводів залишається таким самим, що й в режимі максимального вітру.

Таким чином, відповідно до одиничне навантаження від натиску вітру під час ожеледі становить

$$p_5 := \gamma_{fQ} \cdot C_x \cdot C'_{dc} \cdot C_c \cdot q' \cdot d = 5.711 \frac{H}{м}$$

6. Сумарне навантаження від ваги проводу та натиску вітру.

Одиничне та питоме навантаження від ваги проводу, вкритого ожеледдю становлять:

$$p_6 := \sqrt{p_1^2 + p_5^2} = 10.944 \frac{H}{m} \qquad \gamma_6 := \frac{p_6}{F} = 39.846 \frac{\kappa Pa}{m}$$

7. Сумарне навантаження від ваги проводу, вкритого ожеледдю та натиску вітру.

Одиничні та питомі навантаження від ваги проводу, вкритого ожеледдю та натиску вітру становлять:

$$p_7 := \sqrt{(p_1 + 0.9 \cdot p_2)^2 + p_6^2} = 23.275 \frac{H}{m} \qquad \gamma_7 := \frac{p_7}{F} = 84.737 \frac{\kappa Pa}{m}$$

Зіставлення сумарних навантажень від ваги проводу вкритого ожеледдю, ваги проводу та натиску вітру, а також ваги проводу, вкритого ожеледдю та натиску вітру визначає що режимом максимальних навантажень є режим вітру під час ожеледі. Дійсно

$$p_7 > p_3 > p_6 \qquad 23.275 \frac{H}{m} > 21.786 \frac{H}{m} > 10.944 \frac{H}{m}$$

$$\gamma_7 > \gamma_3 > \gamma_6 \qquad 84.737 \frac{\kappa Pa}{m} > 79.317 \frac{\kappa Pa}{m} > 39.846 \frac{\kappa Pa}{m}$$

Отже

$$\gamma_{max} := \gamma_7 = 84.737 \frac{\kappa Pa}{m}$$

Задача 7.

Повітряна лінія напругою 110 кВ виконана проводами марки АС-240/39. Кліматичні умови в районі траси лінії характеризуються мінімальною температурою -36°C . Експлуатаційні параметри проводу в нормальних режимах повітряної лінії відповідають результатам розв'язання задачі 6.

Дослідити зміну довжини проводу у прогоні 250 м в режимі найбільших навантажень.

Відповідно до умов задачі технічні та експлуатаційні характеристики проводу АС-240/39 у прогоні становлять

- довжина прогону $l := 250 \text{ м}$
- модуль пружності $E := 82.5 \text{ ГПа}$
- коефіцієнт теплового здовження $\alpha := 19.2 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$

Питомі навантаження, які зазнає провід

- від власної ваги $\gamma_1 = 33.99 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$
- в режимі максимальних навантажень $\gamma_{\max} = 84.737 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$

Температурні режими проводу становлять

- мінімальна температура $t_{\min} := -36^{\circ}\text{C}$
- в режимі максимальних навантажень $t_o := -5^{\circ}\text{C}$

Відповідно до умов задачі для розрахунку за рівнянням стану проводу у прогоні за вихідний слід прийняти режим мінімальних температур, тобто

- напруження проводу $\sigma_o := 117.5 \text{ МПа}$
- питоме навантаження $\gamma_o := \gamma_1 = 33.99 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$
- температура проводу $t_o := t_{\min} = -36^{\circ}\text{C}$

Довжина проводу у прогоні у вихідному режимі становить

$$L_o := l + \frac{\gamma_o^2 l^3}{24 \sigma_o^2} = 250.054 \text{ м}$$

Визначимо напруження проводу в режимі максимальних навантажень:

$$A := \frac{1}{24} \cdot \gamma_{max}^2 \cdot E \cdot l^2 = (1.543 \cdot 10^6) \text{ МПа}^3$$

$$B := \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 \cdot E \cdot l^2}{24 \cdot \sigma_0^2} - \alpha \cdot E \cdot (t_o - t_0) = 50.418 \text{ МПа}$$

$$C := \sqrt[3]{\frac{A}{2} + \frac{B^3}{27}} + \sqrt{\frac{A^2}{4} + \frac{A \cdot B^3}{27}} = 115.782 \text{ МПа}$$

$$\sigma := \frac{B}{3} + C + \frac{B^2}{9C} = 135.028 \text{ МПа}$$

Довжина проводу у прогоні в режимі максимальних навантажень дорівнює

$$L := l + \frac{\gamma_{max}^2 \cdot l^3}{24 \sigma^2} = 250.256 \text{ м}$$

Здовження проводу складає

$$\Delta L := L - L_0 = 0.202 \text{ м}$$

що становить

$$\frac{\Delta L}{L_0} = 0.08\% \text{ довжини проводу у вихідному режимі}$$

Задача 8.

Анкерована ділянка повітряної лінії складається з п'яти прогонів, довжини яких складають 260, 240, 245, 255 та 250 м. Відмітки закріплення проводу на опорах становлять 140, 125, 135, 135, 141 та 152 м відповідно.

Визначити довжину зведеного прогону.

Відповідно до умов задачі характеристики закріплення проводу в прогонах анкерованої ділянки становлять

- довжини прогонів

$$l_1 := 260 \text{ м} \quad l_2 := 240 \text{ м} \quad l_3 := 245 \text{ м} \quad l_4 := 255 \text{ м} \quad l_5 := 250 \text{ м}$$

- відмітки закріплення проводу

$$h_1 := 140 \text{ м} \quad h_2 := 125 \text{ м} \quad h_3 := 135 \text{ м} \quad h_4 := 135 \text{ м} \quad h_5 := 141 \text{ м} \quad h_6 := 152 \text{ м}$$

Визначимо довжину зведеного прогону з урахуванням перепадів висот точок закріплення проводу на опорах.

Для першого прогону кут нахилу прямої, що з'єднує точки закріплення проводу до горизонталі становить

$$\theta_1 := \text{atan} \left(\frac{h_2 - h_1}{l_1} \right) = -3.3^\circ$$

В аналогічний спосіб визначаємо кути нахилу прямих, які з'єднують точки закріплення проводу для решти прогонів анкерованої ділянки

$$\begin{aligned} \theta_2 &:= \text{atan} \left(\frac{h_3 - h_2}{l_2} \right) = 2.4^\circ & \theta_3 &:= \text{atan} \left(\frac{h_4 - h_3}{l_3} \right) = 0^\circ \\ \theta_4 &:= \text{atan} \left(\frac{h_5 - h_4}{l_4} \right) = 1.3^\circ & \theta_5 &:= \text{atan} \left(\frac{h_6 - h_5}{l_5} \right) = 2.5^\circ \end{aligned}$$

Косинус зведеного кута нахилу для анкерованої ділянки в цілому становить

$$\cos \theta_{36} := \frac{\frac{l_1}{\langle \cos(\theta_1) \rangle^2} + \frac{l_2}{\langle \cos(\theta_2) \rangle^2} + \frac{l_3}{\langle \cos(\theta_3) \rangle^2} + \frac{l_4}{\langle \cos(\theta_4) \rangle^2} + \frac{l_5}{\langle \cos(\theta_5) \rangle^2}}{\frac{l_1}{\langle \cos(\theta_1) \rangle^3} + \frac{l_2}{\langle \cos(\theta_2) \rangle^3} + \frac{l_3}{\langle \cos(\theta_3) \rangle^3} + \frac{l_4}{\langle \cos(\theta_4) \rangle^3} + \frac{l_5}{\langle \cos(\theta_5) \rangle^3}} = 0.999$$

Таким чином, довжина зведеного прогону дорівнює

$$l_{36} := \frac{1}{\cos \theta_{36}} \sqrt{\frac{l_1^3 + l_2^3 + l_3^3 + l_4^3 + l_5^3}{\frac{l_1}{\langle \cos(\theta_1) \rangle^2} + \frac{l_2}{\langle \cos(\theta_2) \rangle^2} + \frac{l_3}{\langle \cos(\theta_3) \rangle^2} + \frac{l_4}{\langle \cos(\theta_4) \rangle^2} + \frac{l_5}{\langle \cos(\theta_5) \rangle^2}}} = 250.3 \text{ м}$$

Визначимо довжину зведеного прогону у разі нехтування перепадом висот точок закріплення проводу на опорах.

$$l'_{36} := \sqrt{\frac{l_1^3 + l_2^3 + l_3^3 + l_4^3 + l_5^3}{l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5}} = 250.3 \text{ м}$$

Очевидно, що похибка моделювання зневажливо мала і становить

$$\frac{l'_{36} - l_{36}}{l_{36}} = -0.00005\%$$

Отриманий результат свідчить про те, що для рівнинної місцевості допустимо нехтувати перепадом висот точок закріплення проводу на опорах.

Задача 9.

Повітряна лінія напругою 110 кВ виконана проводами марки АС-240/39. Кліматичні умови в районі траси лінії характеризуються мінімальною температурою -36°C та середньорічною температурою $+8^\circ\text{C}$. Експлуатаційні параметри проводу в нормальних режимах повітряної лінії відповідають результатам розв'язання задачі 6.

Визначити вихідний кліматичний режим відповідно до методу допустимих напружень для прогону довжиною 250 м.

Відповідно до умов задачі технічні та експлуатаційні характеристики проводу АС-240/39 становлять

- довжина прогону $l := 250 \text{ м}$
- модуль пружності $E := 82.5 \text{ ГПа}$
- коефіцієнт теплового здовження $\alpha := 19.2 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$

Допустимі напруження

- в режимі максимальних навантажень $\sigma_{max} := 135 \text{ МПа}$
- в експлуатаційному режимі $\sigma_e := 90 \text{ МПа}$

Питомі навантаження, які зазнає провід

- від власної ваги $\gamma_1 = 33.99 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$
- в режимі максимальних навантажень $\gamma_{max} = 84.737 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$

Температурні режими проводу

- мінімальна температура $t_{min} := -36 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- в режимі максимальних навантажень $t_o := -5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- середньорічна температура $t_e := 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Визначимо критичні прогони:

1. Перший критичний прогін

$$l_{1к} := \frac{\sigma_e}{\gamma_1} \sqrt{\frac{\sigma_e - \sigma_{max} + \alpha \cdot E \cdot (t_e - t_{min})}{\frac{E}{24} \left(1 - \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{max}} \right)^2 \right)}} = 301.109 \text{ м}$$

2. Другий критичний прогін

$$l_{2к} := \frac{\sigma_{max}}{\gamma_1} \sqrt{\frac{24 \alpha \cdot (t_o - t_{min})}{\left(\frac{\gamma_{max}}{\gamma_1} \right)^2 - 1}} = 207.87 \text{ м}$$

3. Третій критичний прогін

$$l_{3к} := \frac{\sigma_{max}}{\gamma_1} \sqrt{\frac{\sigma_{max} - \sigma_e + \alpha \cdot E \cdot (t_o - t_e)}{\frac{E}{24} \left(\left(\frac{\gamma_{max}}{\gamma_1} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma_e} \right)^2 \right)}} = 168.075 \text{ м}$$

Отже, співвідношення між критичними прогонами становить

$$l_{1к} > l_{2к} > l_{3к} \quad 301.109 \text{ м} > 207.87 \text{ м} > 168.075 \text{ м}$$

Це означає, що розрахунковим є другий критичний прогін, з яким слід порівнювати фактичний (зведений) прогін

$$l > l_{2к} \quad 250 \text{ м} > 207.87 \text{ м}$$

Таке співвідношення визначає, що, відповідно до методу допустимих напружень, вихідним є режим максимальних навантажень, тобто режим вітру під час ожеледі (див. задачу 6)

Задача 10.

Повітряна лінія напругою 110 кВ виконана проводами марки АС-240/39. Кліматичні умови в районі траси лінії характеризуються мінімальною температурою -36°C , максимальною температурою $+36^{\circ}\text{C}$, середньорічною температурою $+8^{\circ}\text{C}$. Експлуатаційні параметри проводу в нормальних режимах повітряної лінії відповідають результатам розв'язання задачі 6.

Визначити стан проводу у розрахункових кліматичних режимах повітряної лінії в прогоні довжиною 250 м.

Відповідно до умов задачі технічні та експлуатаційні характеристики проводу АС-240/39 становлять

- довжина прогону $l := 250 \text{ м}$
- модуль пружності $E := 82.5 \text{ ГПа}$
- коефіцієнт теплового здовження $\alpha := 19.2 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$

Допустимі напруження проводу

- в режимі максимальних навантажень $\sigma_{max} := 135 \text{ МПа}$
- в експлуатаційному режимі $\sigma_e := 90 \text{ МПа}$

Питомі навантаження, які зазнає провід

- від власної ваги $\gamma_1 = 33.99 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$
- від ваги проводу, вкритого ожеледдю $\gamma_3 = 79.317 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$
- від ваги проводу та натиску вітру $\gamma_6 = 39.846 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$
- в режимі максимальних навантажень $\gamma_7 = 84.737 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$

Температурні режими проводу

- максимальна температура $t_{max} := 36^{\circ}\text{C}$
- мінімальна температура $t_{min} := -36^{\circ}\text{C}$
- температура під час ожеледі $t_o := -5^{\circ}\text{C}$

- середньорічна температура $t_e := 8 \text{ } ^\circ\text{C}$

Відповідно до методу допустимих напружень, вихідним є режим максимальних навантажень (режим вітру під час ожеледі) (див. задачу 9). Тобто

- питоме навантаження $\gamma_0 := \gamma_7 = 84.737 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$

- напруження проводу $\sigma_0 := \sigma_{\max} = 135 \text{ МПа}$

- температура проводу $t_0 := t_o = -5 \text{ } ^\circ\text{C}$

Розрахунки стану проводу будемо виконувати для таких кліматичних режимів:

- 1) експлуатаційний
- 2) максимальної температури
- 3) мінімальної температури
- 4) максимальної ожеледі
- 5) максимального вітру
- 6) вітру під час ожеледі
- 7) грозового періоду
- 8) монтажний

Розглянемо стан проводу в експлуатаційному режимі повітряної лінії.

Розрахункові параметри проводу в даному режимі становлять

- питоме навантаження $\gamma := \gamma_1 = 33.99 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$

- температура проводу $t := t_e = 8 \text{ } ^\circ\text{C}$

Визначимо напруження проводу:

$$A := \frac{1}{24} \gamma^2 \cdot E \cdot l^2 = (2.482 \cdot 10^5) \text{ МПа}^3$$

$$B := \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 E \cdot l^2}{24 \sigma_0^2} - \alpha \cdot E \cdot (t - t_0) = 29.763 \text{ МПа}$$

$$C := \sqrt[3]{\frac{A}{2} + \frac{B^3}{27}} + \sqrt{\frac{A^2}{4} + \frac{A \cdot B^3}{27}} = 63.009 \text{ МПа}$$

$$\sigma := \frac{B}{3} + C + \frac{B^2}{9 C} = 74.492 \text{ МПа}$$

Стріла провисання проводу в даному режимі становить

$$f := \frac{\gamma \cdot l^2}{8 \sigma} = 3.565 \text{ м}$$

В аналогічний спосіб виконуємо розрахунки стану проводу для решти розрахункових кліматичних режимів. Для виконання таких обчислень сформуємо матрицю параметрів розрахункових режимів повітряної лінії

| <i>режим</i> | <i>t</i> | <i>γ</i> |
|-------------------------|-----------|------------|
| <i>експлуатаційний</i> | t_e | γ_1 |
| <i>макс.температури</i> | t_{max} | γ_1 |
| <i>мін.температури</i> | t_{min} | γ_1 |
| <i>макс.ожеледі</i> | t_o | γ_3 |
| <i>макс.вітру</i> | t_o | γ_6 |
| <i>вітер_ожеледь</i> | t_o | γ_7 |
| <i>грозовий_період</i> | 15 °C | γ_1 |
| <i>монтажний</i> | -15 °C | γ_1 |

Для розрахунку напруження проводу у розрахункових режимах організуємо циклічні обчислення

$$\sigma := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in \text{експлуатаційний} \dots \text{монтажний} \\ \left\| \begin{array}{l} A_i \leftarrow \frac{1}{24} \gamma_i^2 \cdot E \cdot l^2 \\ B_i \leftarrow \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 E \cdot l^2}{24 \sigma_0^2} - \alpha \cdot E \cdot (t_i - t_0) \\ C_i \leftarrow \sqrt[3]{\frac{A_i}{2} + \frac{B_i^3}{27}} + \sqrt{\frac{A_i^2}{4} + \frac{A_i B_i^3}{27}} \\ \sigma_i \leftarrow \frac{B_i}{3} + C_i + \frac{B_i^2}{9 C_i} \end{array} \right\| \\ \sigma \leftarrow \sigma \end{array} \right\|$$

Таким чином, вектор-стовпці напружень проводу та стріл провисання мають вигляд

$$\sigma = \begin{bmatrix} 74.492 \\ 58.339 \\ 117.452 \\ 130.149 \\ 91.288 \\ 135 \\ 69.727 \\ 94.179 \end{bmatrix} \text{ МПа} \quad f := \frac{\gamma \cdot l^2}{8 \sigma} = \begin{bmatrix} 3.565 \\ 4.552 \\ 2.261 \\ 4.761 \\ 3.41 \\ 4.904 \\ 3.808 \\ 2.82 \end{bmatrix} \text{ м}$$

Результати виконання систематичного розрахунку проводу зведемо в таблицю

| режим | t (°C) | γ $\left(\frac{\text{кПа}}{\text{м}}\right)$ | σ (МПа) | f (м) |
|------------------|-------------|--|-------------------|------------|
| експлуатаційний | 8 | 33.99 | 74.492 | 3.565 |
| макс.температури | 36 | 33.99 | 58.339 | 4.552 |
| мін.температури | −36 | 33.99 | 117.452 | 2.261 |
| макс.ожеледі | −5 | 79.317 | 130.149 | 4.761 |
| макс.вітру | −5 | 39.846 | 91.288 | 3.41 |
| вітер_ожеледь | −5 | 84.737 | 135 | 4.904 |
| грозовий_період | 15 | 33.99 | 69.727 | 3.808 |
| монтажний | −15 | 33.99 | 94.179 | 2.82 |

Зазначимо, що в режимах максимального вітру та вітру під час ожеледі стріли провисання розраховано у нахилений площині, обумовлений відхиленням проводу під натиском вітру.

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що в жодному розрахунковому режимі механічні напруження не перевищують допустимих значень, що вказує на правильність вибору вихідного кліматичного режиму.

Задача 11.

Повітряна лінія напругою 110 **кВ** виконана проводами марки АС-240/39, змонтованими на проміжних багатограничних опорах ПМ-110-1ф з використанням підвісних лінійних ізоляторів ЛК 70/110-3. Висота закріплення проводів нижнього ярусу над землею дорівнює 13,72 **м**. В режимі максимальної температури температура проводу становить +36°**С**. Експлуатаційні параметри проводу в нормальних режимах повітряної лінії відповідають результатам розв'язання задач 6 та 10.

Визначити режим максимальної стріли провисання проводу та розрахувати довжину габаритного прогону.

Відповідно до умов задачі технічні та експлуатаційні характеристики проводу АС-240/39 становлять

- модуль пружності $E := 82.5 \text{ ГПа}$
- коефіцієнт теплового здовження $\alpha := 19.2 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$
- висота закріплення проводу $h_0 = 13.72 \text{ м}$

Питомі навантаження, які зазнає провід

- від власної ваги $\gamma_1 = 33.99 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$
- від ваги проводу, вкритого ожеледдю $\gamma_3 = 79.317 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$

Напруження проводу в режимах

- максимальної температури $\sigma_{Tmax} = 58.339 \text{ МПа}$
- максимальної ожеледі $\sigma_{Omax} = 130.149 \text{ МПа}$

Температурні режими проводу

- максимальна температура $t_{max} := 36 \text{ }^\circ\text{С}$
- температура під час ожеледі $t_o := -5 \text{ }^\circ\text{С}$

Критична температура дорівнює

$$t_k := t_o + \frac{\sigma_{Omax}}{\alpha \cdot E} \left(1 - \frac{\gamma_1}{\gamma_3} \right) = 42 \text{ }^\circ\text{С}$$

Очевидно, критична температура перевищує максимальну

$$t_k > t_{max} \quad 42 \text{ }^{\circ}\text{C} > 36 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Це означає, що найбільша стріла провисання проводу має місце в режимі максимальної ожеледі, що підтверджують результати розв'язання задачі 10.

Визначимо довжину габаритного прогону виходячи із забезпечення нормованого габариту лінії напругою 110 *кВ* для ненаселеної місцевості

$$G = 6 \text{ м}$$

Довжина габаритного прогону становить

$$l_{gab} := \sqrt{\frac{8 \cdot \sigma_{Omax} \cdot (h_0 - G)}{\gamma_3}} = 318.34 \text{ м}$$

Це означає, що у разі розташування опор на ідеально рівній місцевості відстань між опорами не має перевищувати 318,341 *м*.

Задача 12.

Повітряна лінія напругою 110 *кВ* виконана проводами марки АС-240/39, змонтованими на проміжних багатогранних опорах ПМ-110-1ф з використанням підвісних лінійних ізоляторів ЛК 70/110-3. Лінія захищена грозозахисним тросом ОКГТ-Ц-24, змонтованим за допомогою неізольованого тросового кріплення.

Траса повітряної лінії проходить по ненаселеній сільській місцевості II типу, яку віднесено до 3 району за ожеледдю, 1 району за вітровим навантаженням, 2 району за вітровим натиском під час вітру, 1 району за максимальною температурою, 8 району за мінімальною температурою, 3 району за середньорічною температурою.

Експлуатаційні параметри проводу в нормальних режимах повітряної лінії відповідають результатам розв'язання задач 6 та 10.

Виконати механічний розрахунок грозозахисного тросу в прогоні довжиною 250 м.

Відповідно до умов задачі технічні та експлуатаційні характеристики проводу АС-240/39 становлять

- довжина прогону $l := 250 \text{ м}$

Стріли провисання проводу

- в експлуатаційному режимі $f_e = 3.565 \text{ м}$

- в режимі максимальної температури $f_{Tmax} = 4.552 \text{ м}$

- в режимі грозового періоду $f_{gp.n} = 3.808 \text{ м}$

Технічні параметри тросу ОКГТ-Ц-24 складають

- розрахунковий переріз $F_m := 70.9 \text{ мм}^2$

- зовнішній діаметр $d_m := 11.2 \text{ мм}$

- погонна маса $M_m := 476 \frac{\text{кг}}{\text{км}}$

- модуль пружності $E_m := 119 \text{ ГПа}$

- коефіцієнт теплового здовження $\alpha_m := 12.7 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$

Допустимі напруження тросу

- в режимі максимальних навантажень $\sigma_{max} := 623.5 \text{ МПа}$

- в експлуатаційному режимі $\sigma_{me} := 378 \text{ МПа}$

Характеристичні значення кліматичних навантажень

- товщина стінки ожеледі $b := 19 \text{ мм}$

- швидкісний натиск вітру $q := 400 \text{ Па}$

- натиск вітру під час ожеледі $q' := 200 \text{ Па}$

Температурні режими повітряної лінії

- максимальна температура $t_{max} := 36 \text{ }^\circ\text{C}$

- мінімальна температура $t_{min} := -36 \text{ }^\circ\text{C}$

- температура під час ожеледі $t_o := -5 \text{ }^\circ\text{C}$

- середньорічна температура $t_e := 8 \text{ }^\circ\text{C}$

Геометричні розміри взаємного розташування тросу та проводу у верхньому ярусі (див. рис. 2 та 3) становлять

- висота верхньої траверси $h_3 := 19 \text{ м}$
- висота тросостійки $h_m := 3.3 \text{ м}$
- висота закріплення тросового кріплення $h_4 := h_3 + h_m = 22.3 \text{ м}$
- винос верхньої траверси $a_3 := 2.3 \text{ м}$
- довжина ізоляційного підвісу $\lambda := 1280 \text{ мм}$

Для визначення одиничних та питомих навантажень, які зазнає грозозахисний трос, необхідно розрахувати середню висоту розташування тросу над поверхнею землі. Взаємне розташування проводів верхнього ярусу та грозозахисного тросу визначається контрукцією проміжної опори (див. рис. 2) та будівельною висотою ізоляційного підвісу проводів (див. рис. 3)

Різниця висот точок закріплення грозозахисного тросу та проводів верхнього ярусу на опорі становить

$$\Delta h_m := h_m + \lambda = 4.58 \text{ м}$$

Мінімально допустиму відстань між грозозахисним тросом та проводом в середині прогону визначимо методом лінійної інтерполяції для розрахункового прогону

| l (м) | z (м) |
|------------|------------|
| 200 | 4.0 |
| 300 | 5.5 |

$$z_m := z_0 + \frac{(l - l_{-0})}{(l_{-1} - l_{-0})} (z_1 - z_0) = 4.75 \text{ м}$$

Висоту розташування центру мас тросу визначимо для вихідного режиму грозозахисного тросу – режиму грозового періоду. В такому режимі стріла провисання тросу становить

$$f_{m0} := f_{zp.n} + \Delta h_m - z_m = 3.638 \text{ м}$$

Висота розташування центру мас тросу дорівнює

$$h_{mc} := h_4 - \frac{2}{3} f_{m0} = 19.875 \text{ м}$$

Визначимо одиничні та питомі навантаження, які зазнає трос в експлуатаційних режимах повітряної лінії з урахуванням середнього періоду повторюваності навантажень 15 років

1. Навантаження від власної ваги тросу

Одиничні та питомі навантаження від власної ваги тросу становлять:

$$p_{m1} := g \cdot M_m = 4.67 \frac{H}{m} \quad \gamma_{m1} := \frac{p_{m1}}{F_m} = 65.839 \frac{\kappa Pa}{m}$$

2. Навантаження від ваги ожеледі.

Поправковий коефіцієнт за висотою розташування тросу визначимо за методом лінійної інтерполяції :

| h (m) | k |
|------------|-----|
| 10 | 1.0 |
| 20 | 1.2 |

$$k := k_0 + \frac{(h_{mc} - h_0) \cdot (k_1 - k_0)}{h_1 - h_0} = 1.197$$

В аналогічний спосіб визначимо поправковий коефіцієнт щодо діаметру тросу

| $diam$ (mm) | μ |
|----------------|-------|
| 5 | 1.1 |
| 10 | 1.0 |

$$\mu := \mu_0 + \frac{(d_m - diam_0) \cdot (\mu_1 - \mu_0)}{diam_1 - diam_0} = 0.976$$

Таким чином, одиничне навантаження від ваги відкладень ожеледі становить

$$p_{m2} := \rho \cdot g \cdot \gamma_{fm} \cdot \pi \cdot k \cdot \mu \cdot b \cdot (d_m + k \cdot \mu \cdot b) = 14.398 \frac{H}{m}$$

Тут і в подальшому під час розв'язання задачі використано такі самі коефіцієнти надійності за кліматичними навантаженнями, що й під час розрахунку навантажень на провода повітряної лінії (див. задачу 6).

3. Сумарне навантаження від ваги тросу, вкритого ожеледдю.

Одиничні та питомі навантаження від ваги проводу, вкритого ожеледдю становлять:

$$p_{m3} := p_{m1} + p_{m2} = 19.066 \frac{\text{Н}}{\text{м}} \quad \gamma_{m3} := \frac{p_{m3}}{F_m} = 268.92 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$$

4. Навантаження від натиску вітру.

Оскільки діаметр тросу менший за 20 мм, аеродинамічний коефіцієнт становить

$$C_x := 1.2$$

Коефіцієнту динамічності натиску вітру приймаємо таким самим, що й в розрахунках проводу (див. задачу 6)

$$C_{dc} = 1.249$$

Визначимо коефіцієнт висоти розташування тросу

$$C_h := 1 \cdot \left(0.1 \cdot h_{mc} \cdot \text{м}^{-1} \right)^{2 \cdot 0.15} = 1.229$$

Отже, коефіцієнт впливу розташування тросу становить

$$C_c := C_h \cdot C_R \cdot C_{DIR} = 1.229$$

Таким чином, одиничне навантаження від натиску вітру дорівнює

$$p_{m4} := \gamma_{fmax} \cdot C_x \cdot C_{dc} \cdot C_c \cdot q \cdot d_m = 6.6 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

5. Навантаження від натиску вітру на трос, вкритий ожеледдю

Оскільки в даному режимі трос вкритий ожеледдю, аеродинамічний коефіцієнт дорівнює

$$C_x := 1.2$$

Коефіцієнту динамічності натиску вітру приймаємо таким самим, що й в розрахунках проводу (див. задачу 6)

$$C'_{dc} = 1.556$$

Коефіцієнту впливу розташування тросу залишається таким самим, що й в режимі максимального вітру.

Таким чином, одиничне навантаження від натиску вітру під час ожеледі становить

$$p_{m5} := \gamma_{fQ} \cdot C_x \cdot C'_{dc} \cdot C_c \cdot q' \cdot d_m = 3.649 \frac{H}{м}$$

6. Сумарне навантаження від ваги тросу та натиску вітру.

Одиничне та питоме навантаження від ваги тросу, вкритого ожеледдю становлять

$$p_{m6} := \sqrt{p_{m1}^2 + p_{m4}^2} = 8.084 \frac{H}{м} \quad \gamma_{m6} := \frac{p_{m6}}{F_m} = 114.022 \frac{кПа}{м}$$

7. Сумарне навантаження від ваги тросу, вкритого ожеледдю та натиску вітру.

Одиничні та питомі навантаження від ваги тросу, вкритого ожеледдю та натиску вітру становлять:

$$p_{m7} := \sqrt{(p_{m1} + 0.9 p_{m2})^2 + p_{m5}^2} = 18 \frac{H}{м} \quad \gamma_{m7} := \frac{p_{m7}}{F_m} = 253.885 \frac{кПа}{м}$$

Напущення тросу у вихідному режимі грозового періоду дорівнює

$$\sigma_{m0} := \frac{\gamma_{m1} \cdot l^2}{8 f_{m0}} = 141.387 \text{ МПа}$$

Кут захисту лінії в середині прогону становить

$$\alpha_0 := \text{atan} \left(\frac{a_3}{z_m} \right) = 25.8^\circ$$

Визначимо стан тросу у розрахункових кліматичних режимах:

- 1) експлуатаційний
- 2) максимальної температури
- 3) мінімальної температури
- 4) максимальної ожеледі
- 5) максимального вітру
- 6) вітру під час ожеледі

В розрахунках будемо використовувати такі параметри вихідного режиму

- питоме навантаження $\gamma_{m0} := \gamma_{m1} = 65.839 \frac{\kappa\text{Па}}{\text{м}}$
- температура тросу $t_{m0} := 15 \text{ } ^\circ\text{C}$
- напруження тросу $\sigma_{m0} = 141.387 \text{ МПа}$

Розглянемо стан тросу в експлуатаційному режимі повітряної лінії. Розрахункові параметри тросу в такому режимі становлять

- питоме навантаження $\gamma_m := \gamma_{m1} = 65.839 \frac{\kappa\text{Па}}{\text{м}}$
- температура тросу $t_m := t_e = 8 \text{ } ^\circ\text{C}$

Визначимо напруження тросу:

$$A := \frac{1}{24} \gamma_m^2 \cdot E_m \cdot l^2 = (1.343 \cdot 10^6) \text{ МПа}^3$$

$$B := \sigma_{m0} - \frac{\gamma_{m0}^2 E_m \cdot l^2}{24 \sigma_{m0}^2} - \alpha_m \cdot E_m \cdot (t_m - t_{m0}) = 84.767 \text{ МПа}$$

$$C := \sqrt[3]{\frac{A}{2} + \frac{B^3}{27}} + \sqrt{\frac{A^2}{4} + \frac{A \cdot B^3}{27}} = 111.55 \text{ МПа}$$

$$\sigma_m := \frac{B}{3} + C + \frac{B^2}{9 C} = 146.963 \text{ МПа}$$

Стріла провисання тросу в даному режимі становить

$$f_m := \frac{\gamma_m \cdot l^2}{8 \sigma_m} = 3.5 \text{ м}$$

В аналогічний спосіб виконуємо розрахунки стану тросу для решти розрахункових кліматичних режимів. Для виконання таких обчислень сформуємо матрицю параметрів розрахункових режимів повітряної лінії

| режим | t_m | γ_m |
|------------------|-----------|---------------|
| експлуатаційний | t_e | γ_{m1} |
| макс.температури | t_{max} | γ_{m1} |
| мін.температури | t_{min} | γ_{m1} |
| макс.ожеледі | t_o | γ_{m3} |
| макс.вітру | t_o | γ_{m6} |
| вітер_ожеледь | t_o | γ_{m7} |

Для розрахунку напруження тросу у розрахункових режимах організуємо циклічні обчислення

$$\sigma_m := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in \text{експлуатаційний} \dots \text{вітер_ожеледь} \\ \left\| \begin{array}{l} A_i \leftarrow \frac{1}{24} \gamma_{m_i}^2 \cdot E_m \cdot l^2 \\ B_i \leftarrow \sigma_{m0} - \frac{\gamma_{m0}^2 E_m \cdot l^2}{24 \sigma_{m0}^2} - \alpha_m \cdot E_m \cdot (t_{m_i} - t_{m0}) \\ C_i \leftarrow \sqrt[3]{\frac{A_i}{2} + \frac{B_i^3}{27}} + \sqrt{\frac{A_i^2}{4} + \frac{A_i B_i^3}{27}} \\ \sigma_i \leftarrow \frac{B_i}{3} + C_i + \frac{B_i^2}{9 C_i} \end{array} \right\| \\ \sigma_m \leftarrow \sigma \end{array} \right\|$$

Таким чином, вектор-стовпці напружень тросу та стріл провисання мають вигляд

$$\sigma_m = \begin{bmatrix} 146.963 \\ 126.455 \\ 188.907 \\ 321.387 \\ 202.585 \\ 310.973 \end{bmatrix} \text{ МПа} \qquad f_m := \frac{\gamma_m \cdot l^2}{8 \sigma_m} = \begin{bmatrix} 3.5 \\ 4.068 \\ 2.723 \\ 6.537 \\ 4.397 \\ 6.378 \end{bmatrix} \text{ м}$$

Результати виконання систематичного розрахунку тросу зведемо в таблицю

| <i>режим</i> | <i>t</i> | γ_m | σ_m | f_m |
|-------------------------|----------|---|------------|-------|
| | (°C) | $\left(\frac{\kappa\text{Па}}{\text{м}}\right)$ | (МПа) | (м) |
| <i>експлуатаційний</i> | 8 | 65.839 | 146.963 | 3.5 |
| <i>макс.температури</i> | 36 | 65.839 | 126.455 | 4.068 |
| <i>мін.температури</i> | -36 | 65.839 | 188.907 | 2.723 |
| <i>макс.ожеледі</i> | -5 | 268.92 | 321.387 | 6.537 |
| <i>макс.вітру</i> | -5 | 114.022 | 202.585 | 4.397 |
| <i>вітер_ожеледь</i> | -5 | 253.885 | 310.973 | 6.378 |

Визначимо відстань між проводом та тросом та кут захисту лінії в середині прогону в режимі максимальної температури

$$z_{m.Tmax} := f_{Tmax} - f_{m.Tmax} + \Delta h_m = 5.064 \text{ м}$$

$$\alpha_0 := \text{atan}\left(\frac{a_3}{z_{m.Tmax}}\right) = 24.4^\circ$$

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що в жодному кліматичному режимі не порушено технологічні вимоги до конструкції грозозахисного тросу.

Зазначимо, що відстань між тросом та проводом та кут захисту лінії розраховано тільки для режиму максимальної температури, оскільки інші режими не характеризуються грозовою активністю.

Задача 13.

Повітряна лінія напругою 110 **кВ** виконана проводами марки АС-240/39, змонтованими на проміжних багатогранних опорах ПМ-110-1ф з використанням підвісних лінійних ізоляторів ЛК 70/110-3. Довжини вагового та вітрового прогонів становлять 250 **м**. Експлуатаційні параметри проводу в нормальних режимах повітряної лінії відповідають результатам розв'язання задач 6 та 10.

Виконати перевірку ізоляційних підвісів на механічну міцність, визначити кут нахилу підтримуючого підвісу в режимі максимального вітру та перевірити наближення проводу до траверси опори.

Відповідно до умов задачі технічні та експлуатаційні характеристики проводу АС-240/39 становлять

- довжина вагового прогону $l_{ваг} := 250 \text{ м}$
- довжина вітрового прогону $l_{вітр} := 250 \text{ м}$

Одиничні навантаження:

- від власної ваги $p_1 = 9.336 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$
- від натиску вітру $p_4 = 9.469 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$
- в режимі макс. навантажень $p_{max} := p_7 = 23.275 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$

Напруження проводу:

- в експлуатаційному режимі $\sigma_e = 74.492 \text{ МПа}$
- в режимі макс. навантажень $\sigma_{max} = 135 \text{ МПа}$

Технічні параметри лінійного ізолятора ЛК 70/110-3

- будівельна висота $\lambda := 1280 \text{ мм}$
- маса $M_z := 3.65 \text{ кг}$
- гарантоване руйнівне навантаження $R := 70 \text{ кН}$

Визначимо навантаження, які зазнають підтримуючі ізоляційні підвіси в експлуатаційному режимі та режимі максимальних навантажень із урахуванням відповідних коефіцієнтів запасу міцності:

$$5 \left(p_1 \cdot l_{\text{ваз}} + g \cdot M_z \right) = 11.849 \text{ кН} \quad 11.849 \text{ кН} < 70 \text{ кН}$$

$$2.5 \left(p_{\text{max}} \cdot l_{\text{ваз}} + g \cdot M_z \right) = 14.636 \text{ кН} \quad 14.636 \text{ кН} < 70 \text{ кН}$$

Отримані результати свідчать про те, що в досліджуваних режимах механічні навантаження на ізоляційні підвіси не перевищують гарантованого руйнівного навантаження з урахуванням відповідних коефіцієнтів запасу.

Аналогічні розрахунки для натяжних ізоляційних підвісів дають наступні значення навантажень:

$$5 \sqrt{\left(\sigma_e \cdot F \right)^2 + \left(p_1 \cdot \frac{l_{\text{ваз}}}{2} + g \cdot M_z \right)^2} = 123.748 \text{ кН} \quad 102.452 \text{ кН} > 70 \text{ кН}$$

$$2.5 \sqrt{\left(\sigma_{\text{max}} \cdot F \right)^2 + \left(p_{\text{max}} \cdot \frac{l_{\text{ваз}}}{2} + g \cdot M_z \right)^2} = 92.993 \text{ кН} \quad 92.992 \text{ кН} > 70 \text{ кН}$$

Для натяжних підвісів механічні навантаження у розрахункових режимах перевищують гарантоване руйнівне навантаження ізоляторів, що визначає необхідність застосування дволанцюгових підвісів на анкерних опорах лінії.

Кут відхилення підтримуючого ізоляційного підвісу під натиском вітру становить

$$\varphi := \text{atan} \left(\frac{p_4 \cdot l_{\text{випр}}}{p_1 \cdot l_{\text{ваз}} + 0.5 g \cdot M_z} \right) = 45.2^\circ$$

Тут враховано одиничне значення коефіцієнту коливання ізоляційного підвісу для швидкісного натиску вітру 400 Па (див. задачу 6).

Наближення проводу до траверси опори дорівнює

$$z := \lambda \cdot \cos(\varphi) = 90.215 \text{ см}$$

Таке наближення не порушує обмеження щодо найменших ізоляційних відстаней по повітрю між проводом та опорою. За умовами внутрішніх перенапруг така найменша відстань становить

$$z_{\text{min}} := 80 \text{ см} \quad 90.215 \text{ см} > 80 \text{ см}$$

Нормована найменша відстань між проводом та траверсою опори визначає гранично допустиме значення кута відхилення ізоляційного підвісу

$$\varphi_{max} := \arccos\left(\frac{z_{min}}{\lambda}\right) = 51.3^\circ$$

$$45.2^\circ < 51.3^\circ$$

Задача 14.

Повітряна лінія напругою 110 **кВ** виконана проводами марки АС-240/39, змонтованими на проміжних багатограних опорах ПМ-110-1ф з використанням підвісних лінійних ізоляторів ЛК 70/110-3. Анкерована ділянка повітряної лінії складається з п'яти прогонів, як показано на рис. 4. Довжини прогонів дорівнюють 260, 240, 245, 255 та 250 **м** відповідно. Параметри доаварійного режиму відповідають результатам розв'язання задач 6 та 10.

Розрахувати редуковане тяжіння, коефіцієнт редуції та стрілу провисання проводу в першому та третьому прогонах для аварійного режиму, обумовленого обривом проводу у другому прогоні.

Відповідно до умов задачі технічні та експлуатаційні характеристики проводу АС-240/39 становлять

Довжини прогонів

$$l_1 := 260 \text{ м} \quad l_2 := 240 \text{ м} \quad l_3 := 245 \text{ м} \quad l_4 := 255 \text{ м} \quad l_5 := 250 \text{ м}$$

- розрахунковий переріз

$$F := 274.67 \text{ мм}^2$$

- модуль пружності

$$E := 82.5 \text{ ГПа}$$

- одиничне вагове навантаження

$$p_0 := p_1 = 9.336 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

- напруження

$$\sigma_0 := \sigma_e = 74.492 \text{ МПа}$$

Тяжіння проводу в доаварійному режимі становить

$$H_0 := \sigma_0 \cdot F = 20.461 \text{ кН}$$

Розрахуємо спочатку редуковане тяжіння у першому прогоні анкерованої ділянки.

Для визначення початкового наближення редукованого тяжіння в аварійному режимі повітряної лінії виконаємо графоаналітичне розв'язання рівняння в діапазоні тяжінь

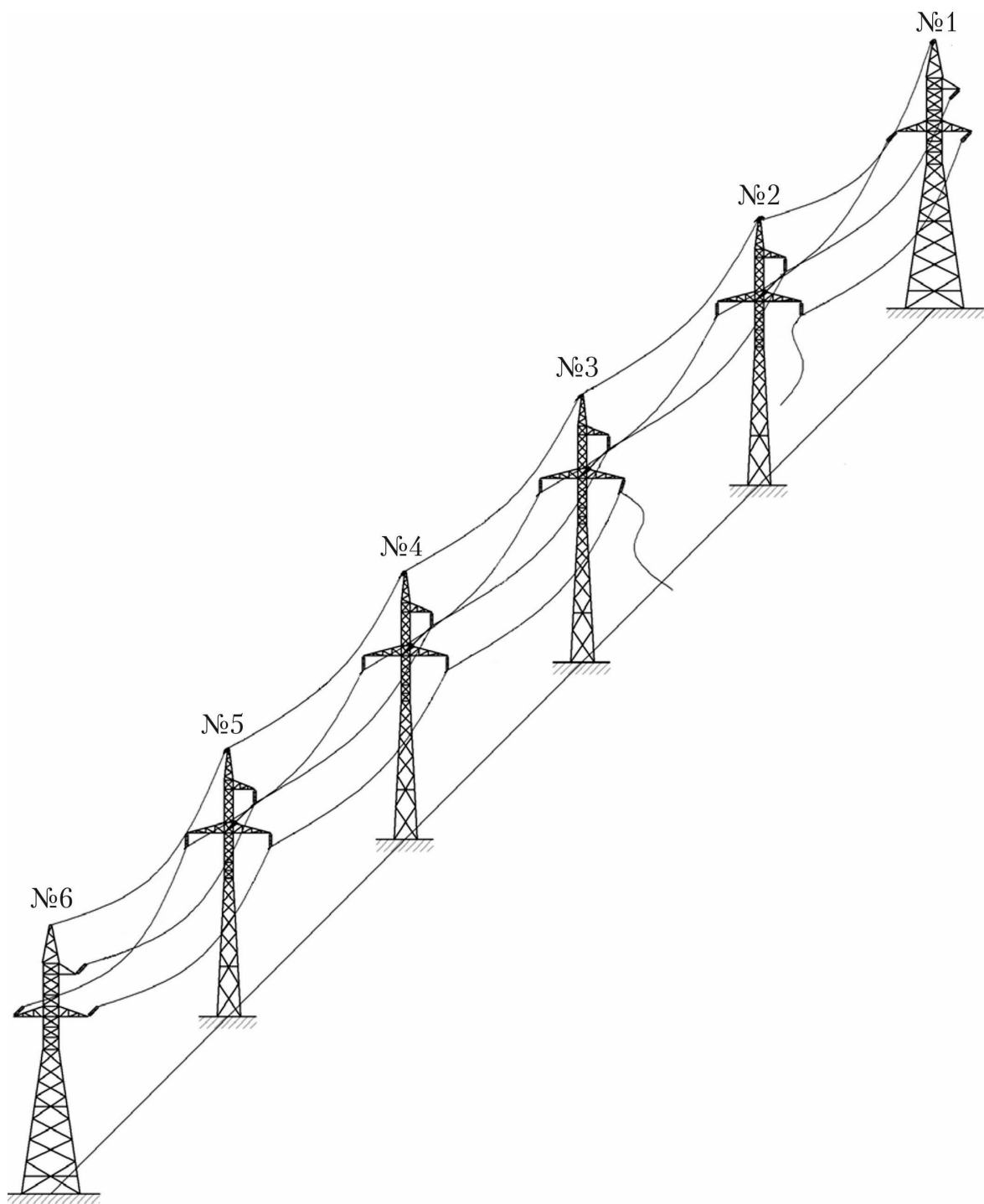


Рис. 4. Схема аварії на анкерованій ділянці повітряної лінії

$$H := 0 \text{ кН}, 0.01 \text{ кН} \dots 20 \text{ кН}$$

Визначимо функції залежності горизонтального переміщення точки закріплення проводу від редукованого тяжіння

$$f_1(H) := \frac{l_1}{E \cdot F} (H_0 - H) - \frac{p_0^2 l_1^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H^2} \right)$$

$$f_2(H) := \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot l_1 + g \cdot M_z}{2 H} \right)^2}}$$

та сформуємо графіки цих функцій

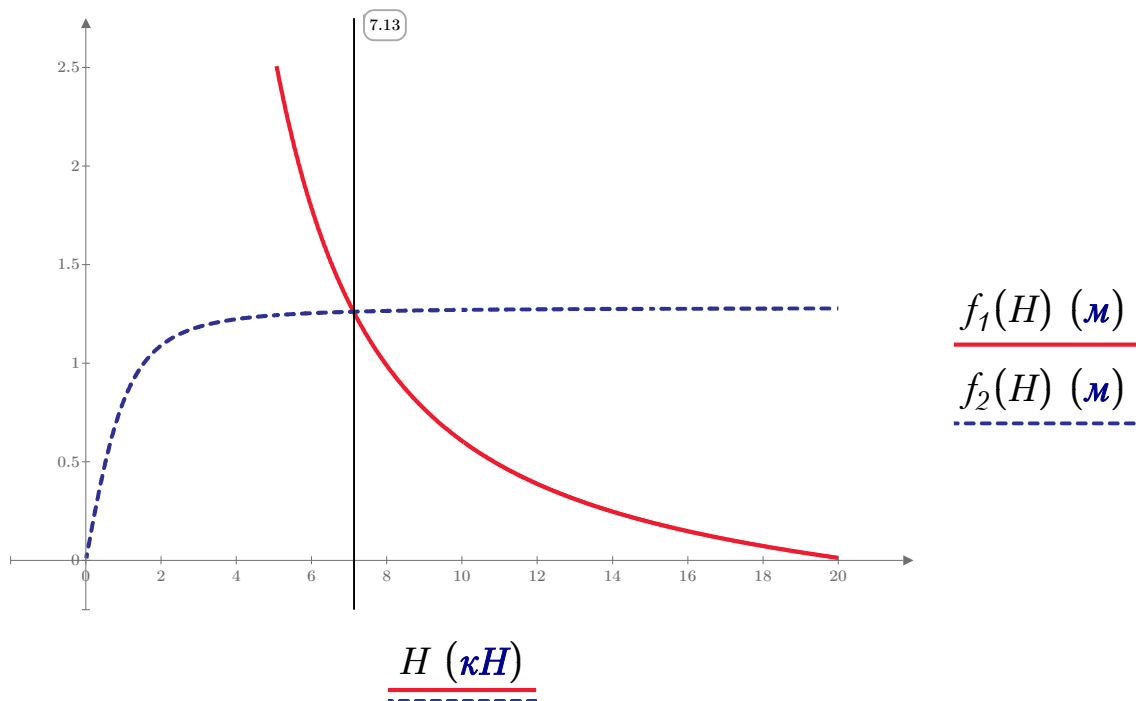


Рис. 5. Графоаналітичне розв'язання задачі розрахунку аварійного режиму повітряної лінії

Точка перетину кривих визначає шуканий розв'язок поставленої задачі. Наближене значення редукованого тяжіння становить 7,13 кН. Це значення будемо використовувати як початкове наближення в числовому розв'язанні рівняння.

$$H := 7.13 \text{ м}$$

$$\frac{l_1}{E \cdot F} (H_0 - H) - \frac{p_0^2 l_1^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H^2} \right) = \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot l_1 + g \cdot M_z}{2 H} \right)^2}}$$

$$H_1 := \text{find}(H) = 7.116 \text{ м}$$

Коефіцієнт редукції та стріла провисання проводу в аварійному режимі в першому прогоні становлять

$$k_1 := \frac{H_1}{H_0} = 0.348$$

$$f_1 := \frac{p_0 \cdot l_1^2}{8 H_1} = 11.086 \text{ м}$$

Для розрахунку редукованого тяжіння в третьому прогоні анкерованої ділянки сформуємо систему алгебраїчних рівнянь, які визначають взаємний зв'язок редукованих тяжінь вцілілих прогонів:

$$\begin{aligned} \frac{l_3}{E \cdot F} (H_0 - H_3) - \frac{p_0^2 l_3^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H_3^2} \right) &= \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot l_3 + g \cdot M_z}{2 H_3} \right)^2}} \quad \downarrow \\ &= \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_3 + l_4) + g \cdot M_z}{2 (H_4 - H_3)} \right)^2}} \quad \downarrow \\ \frac{l_4}{E \cdot F} (H_0 - H_4) - \frac{p_0^2 \cdot l_4^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H_4^2} \right) &= \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_3 + l_4) + g \cdot M_z}{2 (H_4 - H_3)} \right)^2}} \quad \downarrow \\ &= \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_4 + l_5) + g \cdot M_z}{2 (H_5 - H_4)} \right)^2}} \quad \downarrow \end{aligned}$$

$$\frac{l_5}{E \cdot F} (H_0 - H_5) - \frac{p_0^2 \cdot l_5^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H_5^2} \right) = \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_4 + l_5) + g \cdot M_z}{2 (H_5 - H_4)} \right)^2}}$$

Зазначимо, що в наведених виразах двоскладові праві частини визначають відхилення ізоляційних підвісів на опорах, суміжних із відповідним прогоном. Останнє рівняння містить однокладову паву частинну, оскільки п'ятий прогін суміжний з анкерною опорою, для якої переміщення точки закріплення проводу зневажливо мале.

Для розв'язання отриманої системи рівнянь скористуємось методом Ньютона. Самі рівняння визначають нев'язки змін довжин прогонів в аварійному режимі:

$$\begin{aligned} F_3(H_3, H_4) &:= \frac{l_3}{E \cdot F} (H_0 - H_3) - \frac{p_0^2 l_3^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H_3^2} \right) - \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot l_3 + g \cdot M_z}{2 H_3} \right)^2}} \downarrow \\ &\quad + \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_3 + l_4) + g \cdot M_z}{2 (H_4 - H_3)} \right)^2}} \\ F_4(H_3, H_4, H_5) &:= \frac{l_4}{E \cdot F} (H_0 - H_4) - \frac{p_0^2 l_4^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H_4^2} \right) \downarrow \\ &\quad - \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_3 + l_4) + g \cdot M_z}{2 (H_4 - H_3)} \right)^2}} + \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_4 + l_5) + g \cdot M_z}{2 (H_5 - H_4)} \right)^2}} \\ F_5(H_4, H_5) &:= \frac{l_5}{E \cdot F} (H_0 - H_5) - \frac{p_0^2 l_5^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H_5^2} \right) \downarrow \\ &\quad - \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_4 + l_5) + g \cdot M_z}{2 (H_5 - H_4)} \right)^2}} \end{aligned}$$

Частинні похідні по відповідним редукованим тяжінням від нев'язок визначають діагональні елементи матриці Якобі

$$\begin{aligned}
F'_3(H_3, H_4) &:= -\frac{l_3}{E \cdot F} - \frac{p_0^2 l_3^3}{12 H_3^3} - \frac{\lambda \cdot (p_0 \cdot l_3 + \mathbf{g} \cdot \mathbf{M}_z)^2}{4 H_3^3 \sqrt{\left(1 + \left(\frac{p_0 \cdot l_3 + \mathbf{g} \cdot \mathbf{M}_z}{2 H_3}\right)^2\right)^3}} \downarrow \\
&\quad - \frac{\lambda \cdot (p_0 \cdot (l_3 + l_4) + \mathbf{g} \cdot \mathbf{M}_z)^2}{4 (H_4 - H_3)^3 \sqrt{\left(1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_3 + l_4) + \mathbf{g} \cdot \mathbf{M}_z}{2 (H_4 - H_3)}\right)^2\right)^3}} \\
F'_4(H_3, H_4, H_5) &:= -\frac{l_4}{E \cdot F} - \frac{\lambda \cdot (p_0 \cdot (l_3 + l_4) + \mathbf{g} \cdot \mathbf{M}_z)^2}{4 (H_4 - H_3)^3 \sqrt{\left(1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_3 + l_4) + \mathbf{g} \cdot \mathbf{M}_z}{2 (H_4 - H_3)}\right)^2\right)^3}} \downarrow \\
&\quad - \frac{p_0^2 l_4^3}{12 H_4^3} - \frac{\lambda \cdot (p_0 \cdot (l_4 + l_5) + \mathbf{g} \cdot \mathbf{M}_z)^2}{4 (H_5 - H_4)^3 \sqrt{\left(1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_4 + l_5) + \mathbf{g} \cdot \mathbf{M}_z}{2 (H_5 - H_4)}\right)^2\right)^3}} \\
F'_5(H_4, H_5) &:= -\frac{l_5}{E \cdot F} - \frac{p_0^2 l_5^3}{12 H_5^3} - \frac{\lambda \cdot (p_0 \cdot (l_4 + l_5) + \mathbf{g} \cdot \mathbf{M}_z)^2}{4 (H_5 - H_4)^3 \sqrt{\left(1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_4 + l_5) + \mathbf{g} \cdot \mathbf{M}_z}{2 (H_5 - H_4)}\right)^2\right)^3}}
\end{aligned}$$

Недіагональні елементи матриці Якобі визначаються виразами

$$F'_{34}(H_3, H_4) := \frac{\lambda \cdot (p_0 \cdot (l_3 + l_4) + \mathbf{g} \cdot \mathbf{M}_z)^2}{4 (H_4 - H_3)^3 \sqrt{\left(1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_3 + l_4) + \mathbf{g} \cdot \mathbf{M}_z}{2 (H_4 - H_3)}\right)^2\right)^3}}$$

$$F'_{45}(H_4, H_5) := \frac{\lambda \cdot (p_0 \cdot (l_4 + l_5) + \mathbf{g} \cdot M_z)^2}{4 (H_5 - H_4)^3 \sqrt{\left(1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_4 + l_5) + \mathbf{g} \cdot M_z}{2 (H_5 - H_4)}\right)^2\right)^3}}$$

$$F'_{43}(H_3, H_4) := F'_{34}(H_3, H_4)$$

$$F'_{54}(H_4, H_5) := F'_{45}(H_4, H_5)$$

За початкове наближення тяжіння проводу у прогоні, суміжному з аварійною ділянкою, прийємо округлене значення тяжіння, визначене для першого прогону – $7 \kappa H$. Для решти прогонів початкові наближення прийємо на $2 \kappa H$ (25-30%) більше попереднього. Ітераційне уточнення редукованих тяжінь на вцілілих прогонах визначається наступним алгоритмом

$$H_3 := \left\| \begin{array}{l} H \leftarrow \left[\begin{array}{c} 7 \\ 9 \\ 11 \end{array} \right] \kappa H \\ \Delta \leftarrow 1 \kappa H \\ \text{while } \Delta > 0.001 \kappa H \\ \left\| \begin{array}{l} W_0 \leftarrow F_3(H_0, H_1) \\ W_1 \leftarrow F_4(H_0, H_1, H_2) \\ W_2 \leftarrow F_5(H_1, H_2) \\ J_{0,0} \leftarrow F'_3(H_0, H_1) \\ J_{0,1} \leftarrow F'_{34}(H_0, H_1) \\ J_{1,0} \leftarrow F'_{43}(H_0, H_1) \\ J_{1,1} \leftarrow F'_4(H_0, H_1, H_2) \\ J_{1,2} \leftarrow F'_{45}(H_1, H_2) \\ J_{2,1} \leftarrow F'_{54}(H_1, H_2) \\ J_{2,2} \leftarrow F'_5(H_1, H_2) \\ \Delta H \leftarrow J^{-1} W \\ H \leftarrow H - \Delta H \\ \Delta \leftarrow \max(|\Delta H|) \end{array} \right\| \\ H_3 \leftarrow H_1 \end{array} \right\|$$

Таким чином, редуковане тяжіння, коефіцієнт редукції та стріла провисання проводу для третього прогону в аварійному режимі повітряної лінії становлять

$$H_3 = 11.577 \text{ кН} \quad k_3 := \frac{H_3}{H_0} = 0.566 \quad f_3 := \frac{p_0 \cdot l_3^2}{8 H_3} = 6.051 \text{ м}$$

Задача 15.

Повітряна лінія напругою 110 кВ виконана проводами марки АС-240/39, змонтованими на проміжних багатогранних опорах ПМ-110-1ф з використанням підвісних лінійних ізоляторів ЛК 70/110-3. Два суміжних прогони характеризуються довжинами 260 і 240 м відповідно. Перепади висот точок закріплення проводу на опорах, які обмежують прогони, 15 та 10 м таким чином, що точка закріплення проводу на середній опорі знаходиться на нижній відмітці (див. рис. 6). Експлуатаційні параметри проводу відповідають результатам розв'язання задач 6 та 10.

Визначити можливість виникнення явища «виривання» опори в режимі мінімальних температур та у разі необхідності передбачити заходи щодо запобігання «вириванню» опори.

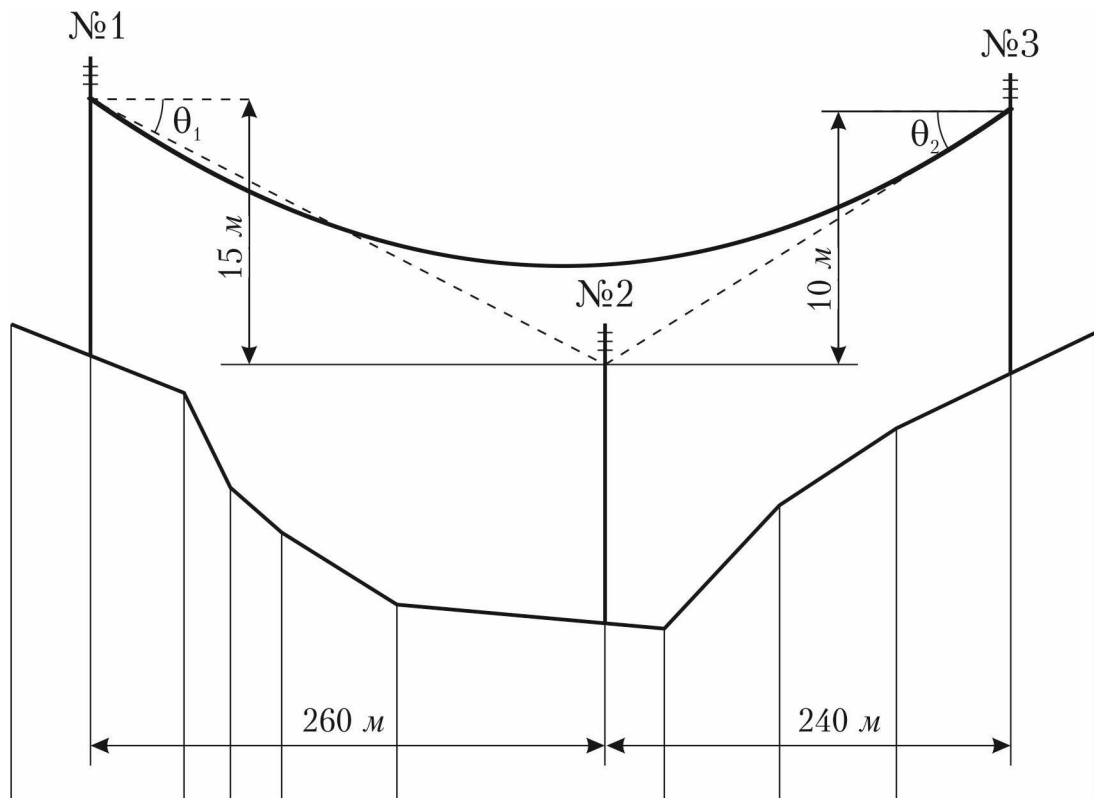


Рис. 6. Схема закріплення проводів на суміжних опорах

Відповідно до умов задачі експлуатаційні характеристики проводу АС-240/39 в режимах мінімальних температур та максимального вітру становлять:

- питоме вагове навантаження $\gamma_1 = 33.99 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$
- одиничне навантаження від натиску вітру $p_4 = 9.469 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$
- напруження проводу $\sigma_{Tmin} = 117.452 \text{ МПа}$

Геометричні характеристики способу закріплення проводу у суміжних прогонах складають:

- розрахунковий переріз проводу $F = 274.67 \text{ мм}^2$
- довжини прогонів $l_1 = 260 \text{ м} \quad l_2 = 240 \text{ м}$
- перепади висот точок закріплення $\Delta h_{12} := 15 \text{ м} \quad \Delta h_{32} := 10 \text{ м}$

Вертикальна відстань між точкою закріплення проводу на опорі №1 та кривою мінімального шаблону над опорою №2 становить

$$\Delta := \frac{\gamma_1 \cdot l_1 \cdot l_2}{2 \sigma_{Tmin}} + \frac{(\Delta h_{12} - \Delta h_{32}) l_1}{l_1 + l_2} = 11.629 \text{ м}$$

Порівняння отриманого значення вертикальної відстані з перепадом висот точок закріплення проводу на опорах №№1 та 2 свідчить про те, що в режимі мінімальних температур спостерігається явище "виривання" опори №2.

$$\Delta < \Delta h_{12} \quad 11.629 \text{ м} < 15 \text{ м}$$

Вертикальна складова тяжіння, направлена на «виривання» опори №2 дорівнює

$$V := \sigma_{Tmin} \cdot F \cdot \left(\frac{\Delta h_{12}}{l_1} + \frac{\Delta h_{32}}{l_2} \right) - \frac{p_1}{2} (l_1 + l_2) = 0.871 \text{ кН}$$

Вагу баласту визначимо виходячи з умов забезпечення гранично допустимого кута відхилення ізоляційного підвісу за умовами наближення проводу до траверси опори (див. задачу 13)

$$\varphi_{max} = 51.3^\circ$$

Вага баласту має бути не меншою за

$$G_{min} := V + \frac{p_4}{\tan(\varphi_{max})} \frac{l_1 + l_2}{2} = 2.767 \text{ кН} \quad \frac{G_{min}}{g} = 282.124 \text{ кг}$$

Тут враховано одиничне значення коефіцієнту коливання ізоляційного підвісу для швидкісного натиску вітру 400 Па (див. задачу 6).

Для забезпечення нормованого кута відхилення ізоляційного підвісу обираємо баласт типу БЛ-400-1 із шістьма тягарцями загальною масою

$$M_6 := 300 \text{ кг}$$

Перевіримо механічну міцність ізоляційного підвісу у разі закріплення на ньому обраного баласту.

Для оціночного розрахунку довжину вагового прогону умовно дорівнюємо до довжини вітрового прогону.

$$l_{ваз} := 0.5 (l_1 + l_2) = 250 \text{ м}$$

Механічний розрахунок підтримуючих ізоляційних підвісів полягає у контролі обмежень

$$5 (p_1 \cdot l_{ваз} + g \cdot (M_z + M_6)) = 26.559 \text{ кН} \quad 26.559 \text{ кН} < 70 \text{ кН}$$

$$2.5 (p_{max} \cdot l_{ваз} + g \cdot (M_z + M_6)) = 21.991 \text{ кН} \quad 21.991 \text{ кН} < 70 \text{ кН}$$

Таким чином, для запобігання виривання, на кожному ізоляційному підвісі опори, розташованій на нижній відмітці, необхідно закріпити баласту типу БЛ-400-1 із шістьма тягарцями загальною масою 300 кг.

Задача 16.

Повітряна лінія напругою 110 **кВ** виконана проводами марки АС-240/39, змонтованими на проміжних багатогранних опорах ПМ-110-1ф з використанням підвісних лінійних ізоляторів ЛК 70/110-3. Лінія перетинає шосейну дорогу II категорії з відміткою полотна 120 **м**. До найближчих анкерних опор по обидва боки переходу по два прогони. Довжина прогону переходу становить 245 **м**, відстань від ближчої опори до вісі дороги дорівнює 120 **м**, відмітки точок закріплення проводу на опорах однакові та становлять 135 **м**. Експлуатаційні параметри проводу в нормальних та аварійному режимах повітряної лінії відповідають результатам розв'язання задач 6, 10 та 14.

Виконати механічний розрахунок переходу повітряної лінії через шосейну дорогу.

Відповідно до умов задачі експлуатаційні характеристики проводу АС-240/39 в режимах максимальних температур та аварійному становлять:

- питома вага навантаження $\gamma_1 = 33.99 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$
- напруження проводу $\sigma_{Tmax} = 58.339 \text{ МПа}$
- редуковане тяжіння в аварійному режимі $H_3 = 11.577 \text{ кН}$

Геометричні характеристики способу закріплення проводу у прогоні складають:

- розрахунковий переріз проводу $F = 274.67 \text{ мм}^2$
- довжина прогону $l_3 = 245 \text{ м}$
- відмітки точок закріплення проводу $h_3 := 135 \text{ м}$ $h_4 := 135 \text{ м}$
- відстань від вісі дороги до опори $x := 120 \text{ м}$
- відмітка полотна дороги $h_{\partial} := 120 \text{ м}$

Стріла провисання проводу над віссю дороги в режимі максимальної температури дорівнює

$$f_x := \frac{\gamma_1 \cdot x}{2 \sigma_{Tmax}} (l_3 - x) = 4.37 \text{ м}$$

В наведеному виразі відсутній другий доданок, оскільки за умовами задачі провід закріплений на опорах, які обмежують перехід, на однакових відмітках.

Габарит над шосейною дорогою становить

$$\Gamma_x := h_4 - f_x - h_0 = 10.63 \text{ м}$$

Отримане значення перевищує мінімально допустиму відстань

$$\Gamma_{min} := 7 \text{ м} \qquad 10.63 \text{ м} > 7 \text{ м}$$

Це свідчить про дотримання умов виконання переходу лінії через автомобільну дорогу для нормальних режимів лінії.

Аналогічні розрахунки для аварійного режиму у разі обриву проводу у прогоні, суміжному із переходом дають такий результат.

Стріла провисання проводу та габарит над дорогою становлять

$$f_{xa} := \frac{\gamma_1 \cdot F \cdot x}{2 H_3} (l_3 - x) = 6.048 \text{ м} \qquad \Gamma_{xa} := h_4 - f_{xa} - h_0 = 8.952 \text{ м}$$

що перевищує мінімально допустиму відстань

$$\Gamma_{min_a} := 5.5 \text{ м} \qquad 8.952 \text{ м} > 5.5 \text{ м}$$

Отже, за умовами аварійного режиму повітряної лінії вимоги щодо виконання переходу через шосейну дорогу також задовольняються.

Задача 17.

Повітряна лінія напругою 110 **кВ** виконана проводами марки АС-240/39. Анкерована ділянка лінії складається з п'яти прогонів довжинами 260, 240, 245, 255 та 250 **м** відповідно. Експлуатаційні параметри проводу прогону довжиною 250 **м** в нормальних режимах повітряної лінії відповідають результатам розв'язання задач 6 та 10.

Сформувати монтажні графіки та монтажну таблицю стріл провисання проводу у всіх прогонах анкерованої ділянки.

Відповідно до умов задачі довжини прогонів анкерованої ділянки складають:

$$l_1=260 \text{ м} \quad l_2=240 \text{ м} \quad l_3=245 \text{ м} \quad l_4=255 \text{ м} \quad l_5=250 \text{ м}$$

Температурні режими повітряної лінії становлять:

- максимальна температура $t_{max}=36 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- мінімальна температура $t_{min}=-36 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- температура монтажного режиму $t_{mnt}:= -15 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Стріли провисання проводу в п'ятому прогоні в режимах:

- максимальної температури $f_{Tmax}=4.552 \text{ м}$
- монтажному $f_{mnt}=2.82 \text{ м}$

Визначимо коефіцієнти лінійного поліному монтажного графіку для п'ятого прогону

$$a:=\frac{f_{Tmax}-f_{mnt}}{t_{max}-t_{mnt}}=0.034 \frac{\text{м}}{\text{К}} \quad b:=f_{Tmax}-a \cdot t_{max}=-5.947 \text{ м}$$

Зазначимо, що коефіцієнт b визначено виходячи із представлення поточного значення температури у Кельвінах (відповідно до системи СИ). Таким чином, аналітичне представлення функції монтажного графіку п'ятого прогону має вигляд

$$f_5(t):=a \cdot t+b$$

Аналітичні вирази функцій монтажних графіків для решти прогонів сформуємо на підставі виразів:

$$\begin{aligned} f_1(t) &:= f_5(t) \left(\frac{l_1}{l_5} \right)^2 & f_2(t) &:= f_5(t) \left(\frac{l_2}{l_5} \right)^2 \\ f_3(t) &:= f_5(t) \left(\frac{l_3}{l_5} \right)^2 & f_4(t) &:= f_5(t) \left(\frac{l_4}{l_5} \right)^2 \end{aligned}$$

Сформуємо графіки монтажних стріл провисання в діапазоні робочих температур проводу

$$t:=-36 \text{ }^{\circ}\text{C}, -35.9 \text{ }^{\circ}\text{C}..36 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

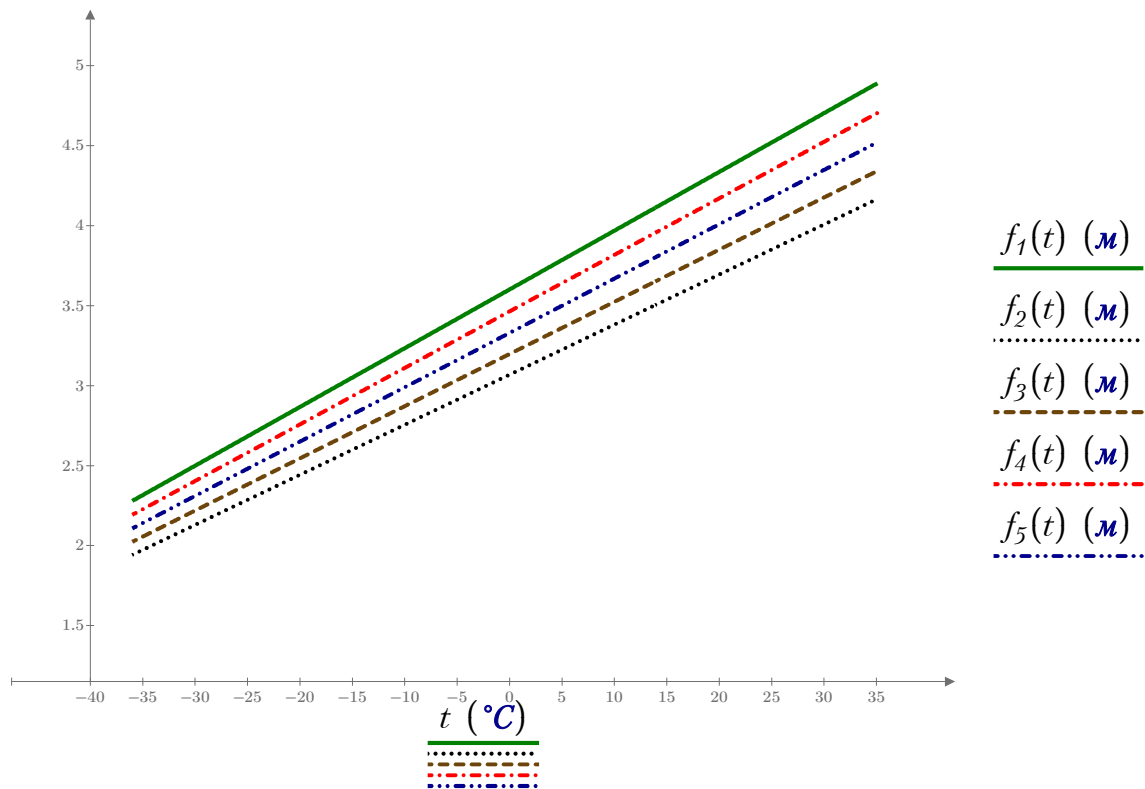


Рис. 7. Графіки монтажних стріл провисання проводу у прогонах анкерованої ділянки

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бошнякович А. Д. Механический расчёт проводов и тросов линий электропередачи / А. Д. Бошнякович. – Москва-Ленинград: Госэнергоиздат, 1962. – 254 с.
2. ГІД 34.20.501-2008 Розрахунок опор і проводів повітряних ліній електропередавання згідно з вимогами глави 2.4 ПУЕ: 2006 і глави 2.5 ПУЕ: 2006 Посібник
3. Глазунов А. А. Основы механической части воздушных линий электропередачи / А. А. Глазунов. – Москва-Ленинград: Госэнергоиздат, 1956. – 192 с.
4. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування / Мінбуд України – К., 2006 – 75 с.
5. Зеличенко А. С. Проектирование механической части воздушных линий сверхвысокого напряжения / А. С. Зеличенко, Б. И. Смирнов. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 336 с.
6. Кацадзе Т. Л. Основы механічних розрахунків повітряних ліній електропередавання : Підручник / Т. Л. Кацадзе. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019. – 336 с. – ISBN 978-966-622-953-6.
7. Кесельман Л. М. Основы механики воздушных линий электропередачи / Л. М. Кесельман. – Москва: Энергоатомиздат, 1992. – 352 с. – ISBN 5-283-01209-3.
8. Короткевич М. А. Проектирование линий электропередачи. Механическая часть /М. А. Короткевич. – Минск: Высшая школа, 2010. – 574 с. – ISBN 978-985-06-1700-2.
9. Крюков К. П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи / К. П. Крюков, Б. П. Новгородцев. – Ленинград: Энергия, 1979. – 312 с.
10. СОУ-Н ЕЕ 20.502:2007 Повітряні лінії електропередавання напругою 35 кВ і вище. Інструкція з експлуатації
11. СОУ-Н ЕЕ 20.579:2009 Кліматичні дані для визначення навантажень на повітряні лінії електропередавання. Методика опрацювання
12. СОУ-Н ЕЕ 20.667:2007 Кліматичні навантаження на повітряні лінії електропередавання з урахуванням топографічних особливостей. Методика
13. Сулейманов В.Н. Электричні мережі та системи: підручн. / В. М. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе. Київ: НТУУ "КПІ", 2008. - 456 с. – ISBN 978-966-622-300-8